

津波遡上の数値計算と実験との比較

宇多高明*・小 俣 篤**・横山 揚久**・山 木 滋***

1. ま え が き

1983年5月の日本海中部地震津波により日本海沿岸は多大な被害を被った。この津波を契機として日本海東北沿岸の津波対策が計画され、浸水域の推定や堤防天端高の再検討のためにシミュレーションが行われた。海岸には護岸、離岸堤などの構造物や砂丘等の微地形が存在し、そこでの水理現象は複雑なものとなる。一方、計算は広範囲にわたって行われるため、用いるモデルは単純なものが望ましい。津波遡上時に水位分布や流速を測定する事は困難であり、得られる有意なデータは痕跡高のみである。よって津波遡上計算の妥当性は痕跡等の実測値との比較によって評価される。この場合、離岸堤や砂丘等の効果の評価については曖昧のまま残されてしまう。そこで海岸に構造物や砂丘がある場合の津波遡上実験を行って水位や流速の時空間分布を測定し、非線形長波の式を基礎式とした簡単なモデルによる数値計算と比較してみたので、その結果をここに述べる。

2. 実験条件

実験に用いた水路は図-1に示す幅5m、長さ30m勾配1/100のモルタル製のものであり、水路沖端にはニ

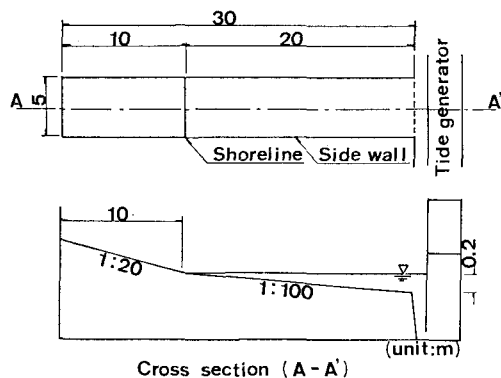


図-1 実験水路

ューマチック型の起潮装置が配置されている。

実験では一様斜面、砂丘、護岸、消波堤、離岸堤の5種類の地形および構造物を想定した模型に波高の異なる3種類の波を入射させて、水位および流速を測定した。模型および波の条件を表-1に示す。この表で T_p は起潮装置に入力したパルス波の周期、 H_0 は起潮装置前面の波高である。模型の形状を図-2に示す。模型は横断方向に一様に設置した。離岸堤模型のうち、不透過堤はモルタルで、透過堤は異形ブロックを用いて製作した。異形ブロックは散乱を防ぐため相互に固定してある。離岸堤については開口部のある不連続堤の実験も行った。測定には容量式波高計とプロベラ流速計を用いた。開口部を設けた離岸堤の場合の測定方法は前報¹⁾で述べた通りである。

実験で用いた津波は起潮装置より孤立波として発生される。発生した波は起潮装置より15m程度進行した後

表-1 実験条件

	タイプ	地形条件	T_p (s)	H_0 (cm)
一次元計算	一様斜面	斜面勾配 1/20	12 15 18	6.47 7.68 8.44
		斜面勾配 1/30	12 18	6.00 8.56
	砂丘	砂丘高 6 cm	18	8.60
		砂丘高 12 cm	18	8.97
	護岸	直立護岸 4 cm	18	8.66
		不透過連続堤 高さ 5 cm	12 18	6.08 8.79
	離岸堤	不透過連続堤 高さ 6 cm	12	6.80
		透過連続堤 高さ 6 cm	12	6.70
		透過不連続堤 $B/W=2.0$	12	6.10
	二次元計算	離岸堤 高さ 6 cm	透過不連続堤 $B/W=1.0$	12
透過不連続堤 $B/W=2.0$			8 12	3.30 7.40
透過不連続堤 $B/W=1.0$			8 12	3.70 8.00

注) B: 離岸堤長
W: 離岸堤開口幅

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長
** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室
*** 正会員 理修 (株)アイ・エス・エー新土木研究所

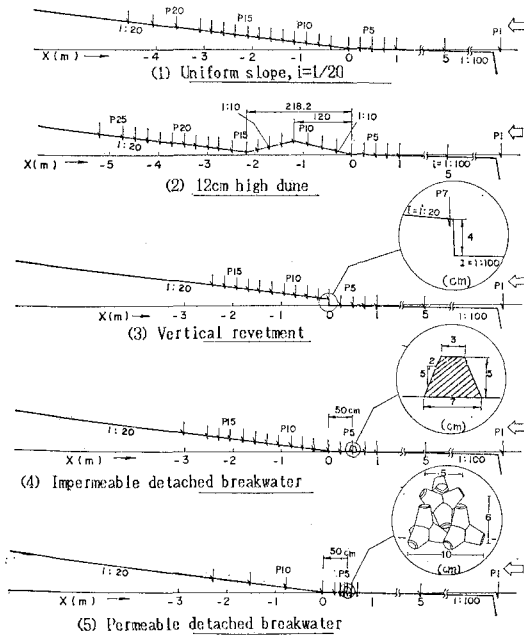


図-2 模型形状

に先端が2~3波分散し、分散後すぐに碎波段波となって模型に到達する。

2. 計算モデル

今回用いた計算モデルは浅水方程式を leapfrog 法により 5 cm の地形メッシュ, 0.02 秒の時間間隔の下で差分化して解く単純なものである。

基礎式を以下に示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, η : 静水位からの水位上昇量

h : 静水深 (陸上部では静水位からの地盤高までの負の値), D : 全水深 ($h + \eta$)

n : Manning の粗度係数

Q_x, Q_y : x, y 方向の線流量

ただし, 1次元計算の場合は上式を1次元化している。計算では実験と同一の模型条件を用い, 起潮装置前面の波形を初期入力波形として与えた。 n の値については計算の遡上高が 1/20 一樣斜面での実験結果と合うように決定し, 0.012 とした。

津波の陸上への遡上, および引き波時の海底露出の計

算は, D の値によって地盤が水没しているか露出しているかを判断して行う岩崎・真野の方法²⁾を用いた。

また, 離岸堤のように越流計算が必要と考えられる場合には, 本間公式³⁾を用いた計算も行い, 上記の単純なモデルとの比較を行った。

離岸堤を透過する流量を求める際には次式を用いた。

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f}{2l} \frac{Q_x}{D} \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに, λ : 空隙率 ($=0.5$), l : 離岸堤の幅

f : 抵抗係数 (≈ 8.6 , 富永・坂本⁴⁾より)

以上の計算モデルを用いて, 時間ステップ 0.02 秒で水理模型実験に対応した計算を行った。開口部を有する離岸堤のケースでは, 起潮装置から汀線沖 5 m までを 1 次元計算範囲とし, それ以後を 2 次元計算で行った。

4. 実験と計算との比較

4.1 遡上高

実験と計算による遡上高の比較結果を図-3に示す。

開口部を有する離岸堤 (同図▲印) の場合は遡上高の最大値と比較してある。実験では水位や流速の全ての測定は同時に行えないため, 測定は数回にわけて行った。このとき初期波形に数 mm の差を生じる場合があるため計算ではそれらの平均的な波形を初期波形としている。そのため遡上高測定時の初期波形と計算に用いたものとは必ずしも一致していない。津波計算においては初期波形の設定が重要な問題であり遡上高の計算結果に強く影響する。同図に示す結果では, 両者の差は最大でも一割以内であり, この点を考慮すると遡上高については計算モデルが妥当な値を示していることがわかる。離岸堤の場合, 越流計算に本間式を用いた場合に差が大きい。個々の問題については以下に考察する。

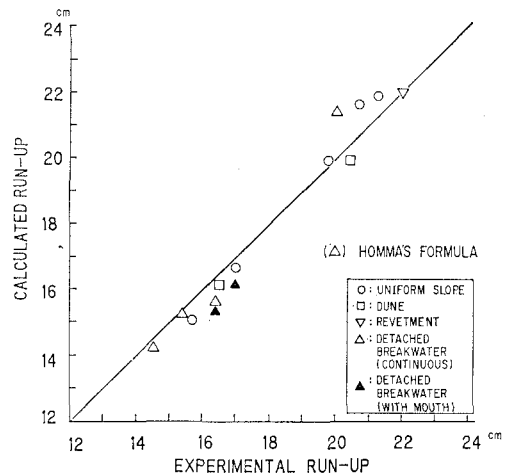


図-3 遡上高の比較

4.2 一次元計算

ここでは一次元計算と実験とを水位、流速の時空間分布により比較する。一樣斜面、砂丘、護岸、および離岸堤（不透過堤、透過堤）の水位、流速の時系列データおよび水位の空間分布の比較を図—4～7に示す。これらは $T_p=18$ sec のケースの結果である。図中に示す全ての時間は P2 地点での水位上昇開始時を基準とした。水位には汀線より沖側では静水位を、岸側では底面を基準にとった。流速測定は底面上 5 mm で行った。用いた流速計が一方向流測定用であるため、流速は絶対値の記録となっている。また、水位の空間波形は図—2に示した測点での水位測定結果から求めた。

a) 一樣斜面

図—4 a) によると、P6～P2にかけて $t>8$ sec に 1/20 斜面からの反射波が見られる。この反射波は実験では分散して沖へ進行する。計算では分散性を考慮していないため、この状況は再現されず、実験に比べ計算の方が反射波の位相も早くなっている。この原因は明らかではないが、計算値の入射波高がやや高めになっていることが一因に挙げられる。b) の流速波形を見ると計算での戻り流れが実験よりも長く継続しているが、これは実験において水位が低くなると流速計が露出してしまうためである。計算では碎波条件や先端部での混合など特に考慮していないが、水位、流速波形共に計算と実験は良く一致している。また、c) に示す空間波形も良く一致している。

b) 砂丘

砂丘に津波が遡上する場合の水位、流速の時空間波形を図—5 a) b) c) に示す。砂丘は P7～P15 に位置し、その頂点は P11 にある。砂丘面の勾配は 1/10 であり入射波はまずこの砂丘面でかなり反射する (P7 より沖)。図—5 a) b) によると砂丘頂 P11 では計算での水位が高く流速はほぼ等しい。また、砂丘頂を越えた後の P12, P14 でも遡上初期における水位はほぼ等しいものの、計算での流速はかなり速くなっている。これらのことから、砂丘頂より岸側では遡上初期において計算流量が大きく、この結果 P16 より陸側の斜面からの反射波の発生が実験より計算において早くなったと考えられる。c) の空間波形で $t=10$ sec での計算結果が $t=11$ sec の実験結果と比較的合うのもこのためであると考えられる。砂丘頂までは計算と実験の流速が良く一致していることから、水位、流速波形の相違は砂丘頂部での剝離による抵抗などが影響していると考えられる。これは、実験での砂丘頂部の空間波形が計算に比べせき上がったような形になっていることからもうかがえる。しかし、単純なモデルを用いているにもかかわらず、計算は砂丘周辺での津波遡上を良く再現している。

c) 護岸

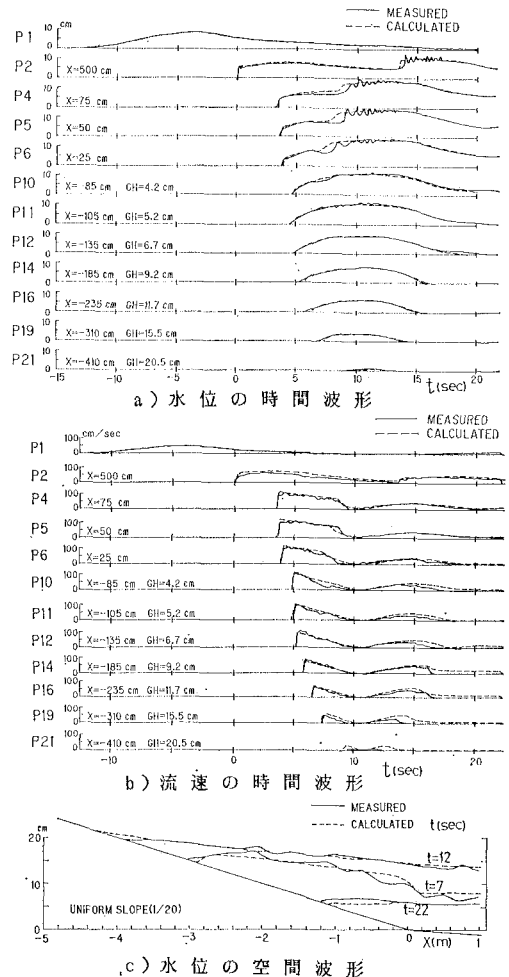
護岸の計算結果は水位、流速共に陸上部でやや大きめであったが全体的に実験と良く一致した⁵⁾。護岸は地形として計算格子に取り入れられているが、津波遡上時に護岸基部は死水域となるため、そこでのエネルギー損失が小さく特別な考慮をしなくとも本モデルで十分な計算が行えるものと考えられる。

d) 離岸堤

実験に用いた離岸堤の断面は図—2 (4), (5) に示した通りであり、1つの計算格子で地形として表現できる。そこで、離岸堤からの越流の計算は、基礎式のみで行った場合と本間の越流公式を用いた場合の二通りで行った。このときの離岸堤は不透過堤としている。また、離岸堤を透過堤とした計算も行った。このときは基礎式のみで計算を行っている。

i) 不透過堤

基礎式のみで計算した結果を図—6に示す。P5の離岸堤天端上では計算値に比べ実験値の水位が高く (図—



図—4 時空間波形の比較 (1/20 一樣斜面)

6 a), 流速はほぼ等しくなっている (図-6 b)). さらに, 実験値では P6, P7 で薄く速い流れが継続している. また, P8 より沖側では反射波の発生位置が計算値と実験値で異なる. これらは相互に関連したものであり, 離岸堤上 (P5) での遡上時の水位, 流速波形の違いが離岸堤より陸側の遡上時の水位, 流速波形や全体の反射波形に影響しているものと考えられる. さらに, c) の空間波形を見てもわかるように, 越流初期は堤頂と堤岸側の水位差が大きく薄い水脈が斜面をはい上がっている. このように越流計算では堤体から剝離し落下する水脈の取り扱いが重要であることがわかる.

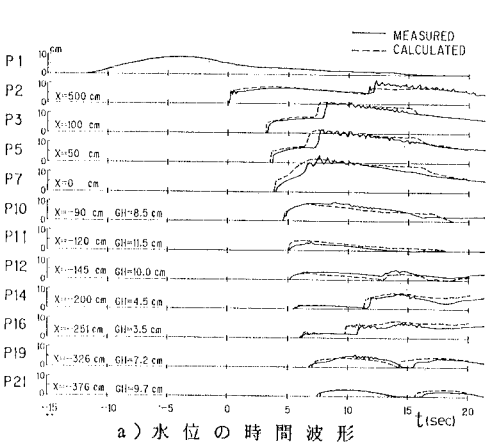
本間の越流公式を用いて計算した結果は, 遡上高 (図-3) に見られるように基礎式のみで計算した場合よりも実験との適合性は良くない⁹⁾. 離岸堤での越流量を抑え過ぎ, その結果遡上高も過少な値となった.

越流計算を含んだ津波の数値計算については後藤ら⁹⁾が検討している. そこでは越流水深の取り方や越流水脈

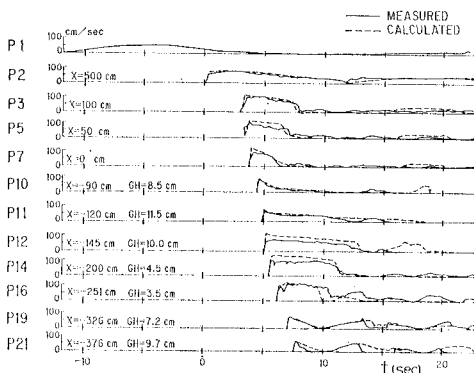
の水面形などを考慮して計算を行っており, 本間式を用いた場合でも実験と計算は良好な一致を示している. 本計算ではモデルの簡素化を第一としたため越流境界に本間式を適用しているだけであり, この点に問題があるものと考えられる. 側面からのビデオ撮影によると, 堤頂から落下する越流水脈は 10 cm 程度堤岸側に着水しており, この部分での水面勾配や抵抗をモデルに取り組む必要がある.

ii) 透過堤

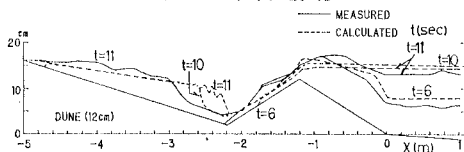
透過堤では越流の状況が不透過堤と異なり, 越流水脈の剝離が顕著ではなく離岸堤を乗り越えるような流れとなる. そのため離岸堤を地形として扱い透過性を考慮した計算結果は 図-7 に示すように水位, 流速波形ともに不透過堤に比べ実験と一致するようになる. なお, 離岸堤直前直後の P4, P6 で流速値が著しく小さいが, この値が透過流速に相当するものと考えられる.



a) 水位の時間波形

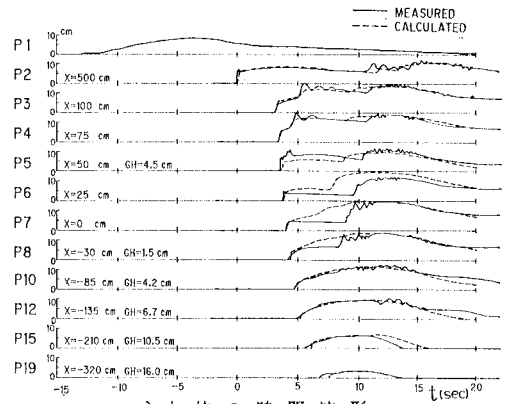


b) 流速の時間波形

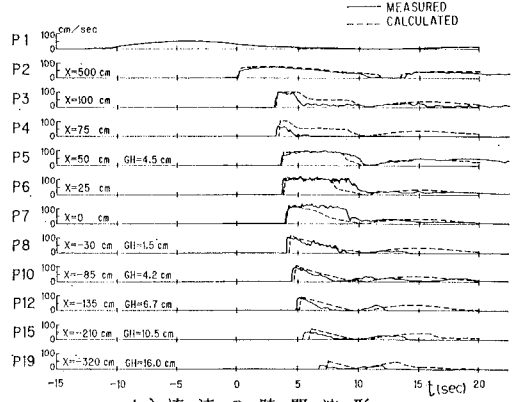


c) 水位の空間波形

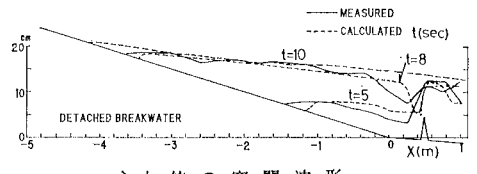
図-5 時空間波形の比較 (砂丘, 高さ 12 cm)



a) 水位の時間波形



b) 流速の時間波形



c) 水位の空間波形

図-6 時空間波形の比較 (不透過連続離岸堤: 基礎式のみの場合)

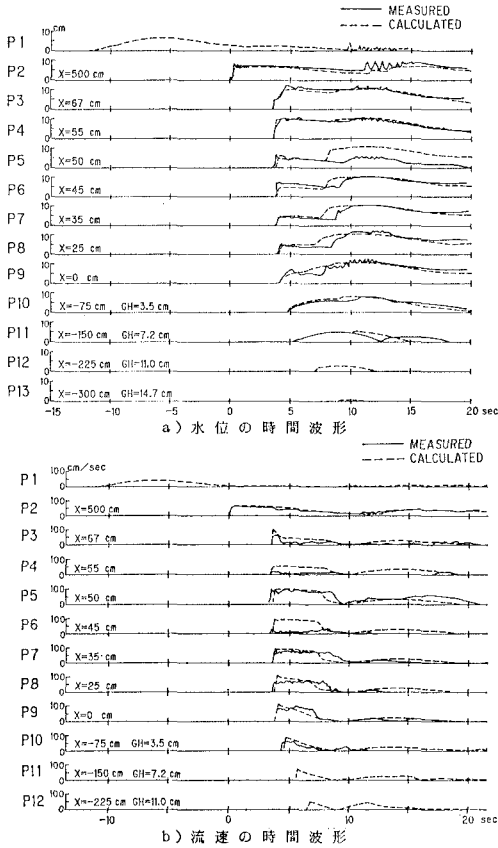


図-7 時空間波形の比較 (透過連続離岸堤: 基礎式のための場合)

4.3 二次元計算

開口部を有する場合の実験結果については前報¹⁾で述べた。2次元計算においては、計算において無視されている混合現象が顕著であり、局所的な水位や流況が合わない原因となった。しかし、遡上の形態や流況の定性的パターンおよび遡上高の沿岸方向分布は良く一致した⁵⁾。また、遡上高は図-3に示したように計算結果の方がやや小さい。混合現象が遡上高に影響するならば、これは

逆の結果である。遡上高は回折波の進行に伴う平面的な水位分布に強く影響される。つまり、回折波の進行とそれに伴う混合現象が水位分布に影響し(計算の方が全体的に水位の空間変化が小さい)、その結果計算に比べ遡上高が高くなるものと考えられる。よって、越流が卓越するような場合、精度の良い計算を行うためには堤背後の混合現象をモデルにとり込む必要がある。

5. 結 び

海岸に構造物や砂丘がある場合の津波遡上について実験と計算とを比較した結果、ここで用いたような簡単な計算モデルでも実用上十分な精度を持つ計算が行えることがわかった。連続した不透過離岸堤では越流の取り扱いに問題がある。離岸堤のある海岸を対象とした計算では、離岸堤を1メッシュで表わし、越流境界とせず地形として取り扱う方が精度がよい。通常の開口部を持つ透過堤では透過性に注意すれば実用計算に問題はないものと考えられる。

ここに記した計算は建設省で実施した「日本海中部地震津波対策調査」の一環として行われたものである。計算にあたって多くの御指導を頂いた東北大学 首藤伸夫教授、港湾技術研究所 後藤智明主任研究官に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 宇多高明・小俣 篤・横山揚久: 離岸堤の津波遡上抑制効果, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 461~465, 1986.
- 2) 岩崎敏夫・真野 明: オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 70~74, 1979.
- 3) 昭和60年版水理公式集; 土木学会編.
- 4) 富永正照・坂本忠彦: 透過性構造物による波の変形に関する研究(第1報), 第16回海岸工学講演会講演集, pp. 309~319, 1969.
- 5) 宇多高明・小俣 篤・横山揚久: 津波遡上に関する実験報告書——構造物の効果を中心として——, 土木研究所資料, 第2486号, 1987.
- 6) 後藤智明・首藤伸夫・笹川稔郎: 陸上大障害群の津波氾濫時における抵抗, 第25回水理講演会論文集, pp. 125~132, 1981.